

РАЗРАБОТКА «УМНОЙ ТЕПЛИЦЫ» НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ «РАСТЕНИЕ–СРЕДА–СИТУАЦИЯ–УПРАВЛЕНИЕ»*

М.Г. ГРИФ¹, Б.А. БЕЛЬГИБАЕВ², А.А. УМАРОВ³

¹ 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры автоматизированных систем управления. E-mail: grifmg@mail.ru

² 050400, РК, г. Алматы, пр. Аль-Фараби, 71, Казахский национальный университет им. Аль-Фараби, доктор технических наук, доцент кафедры «Искусственный интеллект и Big Data». E-mail: bbelgibaev@list.ru

³ 050400, РК, г. Алматы, пр. Аль-Фараби, 71, Казахский национальный университет им. Аль-Фараби, PhD докторант кафедры «Искусственный интеллект и Big Data». E-mail; uaa_77@mail.ru

Теплица представляет собой агроэкологическую систему закрытого типа, в которой энергетические процессы строго детерминированы технологическим процессом выращивания растений с учетом влияния окружающей среды.

Как известно, модели теплиц делятся на два типа: модели белого ящика и модели черного ящика. Известная модель системы «почва–растение–атмосфера» относится к первому типу, построенному на физических принципах термо-, гидро- и газовой динамики. Она состоит из нескольких сложных дифференциальных уравнений, в которых используются многочисленные коэффициенты и параметры, которые заранее известны. Такие модели громоздки и требуют больших вычислительных ресурсов и временных затрат.

Предлагаемая модель системы «растение–среда–ситуация–управление» является практическим аналогом известной модели «почва–растение–атмосфера». Главным отличием настоящей модели является то, что она относится к модели типа черного ящика, являющейся аппроксимацией наблюдаемых процессов и позволяет описывать процессы на основе экспериментальных данных.

На базе модели «растение–среда–ситуация–управление» разработана программно-техническая система «умная теплица», которая является человеко-машинной системой с рациональным разделением функции подготовки (ЭВМ) и функции принятия решений (человек). Она позволяет выполнять контроль и управление ростом растения в течение вегетационного периода с учетом влияния условий среды. Система внедрена и используется в теплице Казахского национального университета им. Аль-Фараби.

* Статья получена 10 сентября 2020 г.

Ключевые слова: умная теплица, экспертная система, закон оптимума, человеко-машинная система, система «почва–растение–атмосфера», IoT-устройства, облачные технологии

ВВЕДЕНИЕ

Для полноценного роста растений необходимо соблюдение технологических процессов по обеспечению условий, близких к закону оптимума в биологии. Тепло, свет, вода, воздух и питание – все эти факторы необходимы и одинаково важны для растений [5, 8, 12].

Известные модели теплиц с точки зрения учитываемых факторов можно разделить на три типа: а) модели, учитывающие только состояние среды (модели микроклимата); б) модели, учитывающие только состояние растения в течение вегетационного периода развития; в) модели, учитывающие и состояние растения, и состояние среды. Очевидно, что третий тип модели является очень трудоемким и сложным с точки зрения разработки.

Модели первого типа [6, 9, 10, 11, 13] являются более простыми и легко реализуемыми. Большинство их однофакторные, то есть предусматривают регулирование только одного технологического процесса (например, температуры или полива). Поэтому они часто используются на практике и широко внедрены на рынке тепличного хозяйства. Недостаток моделей первого типа в том, что они не учитывают состояния растения, а растение является самым главным звеном системы.

Модели второго типа [5, 12] имеют более сложную математическую интерпретацию и в основном используются в биологических исследованиях динамики роста, оценки перехода фенофаз и т. д. Такие модели известны под названием «почва–растение–атмосфера». Сложность моделирования процессов агроэкосистем типа «почва–растение–атмосфера» состоит в том, что они включают большое количество подсистем различной физической, химической и биологической природы, и разработка таких систем очень трудоемкая.

Первые два типа моделей не могут дать целостного описания процессов выращивания растений в теплице. Поэтому возникла необходимость объединения их возможностей в единую модель [3, 4].

Еще есть важное обстоятельство, заключающееся в том, что никакие точные и вычислительные системы не могут заменить человека в принятии решений и управлении сложными системами [2]. АСУ ТП относится к человеко-машинным системам, так как центральное место в управлении сохраняется за человеком. Поэтому в настоящей работе предлагается подход, основанный на человеко-машинной обработке данных. То есть он сочетает в себе машинную обработку (мониторинг и управление состояния среды) данных и полуавтома-

тическую обработку (наблюдение за состоянием растения осуществляется человеком).

Разработанная модель системы «растение–среда–ситуация–управление» является практическим аналогом известной модели биологической системы «почва–растение–атмосфера», объединяющей в себе и биологическую, и техническую составляющие. Предназначение системы «растение–среда–ситуация–управление» – оценка соответствия закону оптимума состояния текущих условия среды и растения.

1. МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ «РАСТЕНИЕ–СРЕДА–СИТУАЦИЯ–УПРАВЛЕНИЕ»

Математическая модель системы «растение–среда–ситуация–управление» состоит из блоков: среда, растение, ситуация и управление.

Блок 1 – «Среда». Описывает состояние микроклимата в суточном (атмосфера – температура воздуха, относительная влажность воздуха; почва – относительная влажность почвы; свет – освещенность) и биологическом масштабе времени (наступление фазы развития растения и т. д.).

Блок 2 – «Растение». Описывает состояние растения и является объектом управления.

Блок 3 – «Ситуация–управление». Характеризует переменные состояния системы и выбор режима управления (вентиляция, освещение, капельное орошение) в зависимости от определенной ситуации. В этом блоке рассчитываются интегральные показатели среды и растения.

Модель системы «растение–среда–ситуация–управление» задается в виде *кортежа*

$$\langle Z, F, OPT_{real}, OPT, O_{real}, O, U_{real}, U, D(t), J(t), t(i, j) \rangle, \quad (1)$$

$$Z = \langle Z(D, m), Z_{FAZA}(J, t^*) \rangle,$$

$$F = \langle F_{IN}(D, k), F(D, p), F_{OUT}(J, l), F_{FAZA}(J, t^*) \rangle,$$

$$OPT_{real}(D) = \langle r, PF(D, k), \overline{PF}(D, p) \rangle, \quad O_{real}(D) = \langle p, OPT_{real}(D) \rangle,$$

$$U_{real}(D) = \langle p, O_{real}(D) \rangle,$$

$$OPT(J) = \langle PF_{OUT}(J), PF_{FAZA}(J, t^*), PZ_{FAZA}(J, t^*) \rangle,$$

$$O(J) = \langle Z(D, m), F_{OUT}(J), OPT(J), Z_{FAZA}(J, t^*), F_{FAZA}(J, t^*) \rangle,$$

$$U(J) = \langle r, O(J) \rangle,$$

где $Z(D, m)$ – состояние растения – входной параметр (данные); $F_{IN}(D, k)$ – состояние среды – входной параметр (данные); $F(D, p)$ – состояние среды по каждому процессу – расчет; $F_{OUT}(D, l)$ – интегральные состояния среды – расчет; $P_{FAZA}(J)$ – условия наступления фаз развития растения – входной параметр (задание); $Z_{FAZA}(J)$ – выполнение условия $P_{FAZA}(t)$ по состоянию растения – расчет; $F_{FAZA}(J)$ – выполнение условия $P_{FAZA}(t)$ по состоянию среды – расчет; $PZ(J)$ – условия оптимума растения – входной параметр (задание); $PF(D, k)$ – четкие условия оптимума среды – входной параметр (задание); $\overline{PF}(D, p)$ – нечеткие условия оптимума среды – входной параметр (задание); $PF_{OUT}(D, l)$ – условия интегрального состояния среды – входной параметр (задание); $U_{real}(D, p)$ – режим управления по климату – расчет; $U(J, r)$ – режим управления по фазе – расчет; $OPT_{real}(D)$ – закон (функция) оптимума по климату – выходной параметр (задание); $OPT(J)$ – закон (функция) оптимума по фазе – выходной параметр (задание); $PZ_{FAZA}(J, t^*)$ – момент наступления фаз развития по состоянию растения – расчет; $PF_{FAZA}(J, t^*)$ – момент наступления фаз развития по состоянию среды – расчет; $O_{real}(D, p)$ – оценка состояния среды оптимуму – расчет; $O(J)$ – интегральная оценка состояния среды и растения оптимуму – расчет; $t \in [0; T]$ – период.

Дискретные моменты времени $t(i, j)$ описываются как функции $D(t), J(t)$:

$$D(t) = \begin{cases} 1, & t = t^{\text{восх}}, \\ 0, & t = t^{\text{зах}}, \end{cases}$$

$$J(t) = \begin{cases} 1, t = t^*, \\ 2, t = t^{**}, \\ 3, t = t^{***}, \end{cases}$$

где t^* , t^{**} , t^{***} – моменты наступления 1-й, 2-й, 3-й фазы развития растения;
 $t^{\text{восх}}$, $t^{\text{зах}}$ – моменты восхода и захода солнца.

Обозначения и индексы: t – время обычное непрерывное; $D(t)$ – время дискретное (суточное); $i = 0, 1, 2, \dots, n$ – номер дня; $J(t)$ – время дискретное (биологическое); $J = 0, 1, 2, 3$ – номер фенофазы растений; $r = 0, 1, 2, 3$ – номер режима управления: норма, вентиляция, освещение, полив; $k = 1, 2, 3, 4$ – номер параметра среды: температура воздуха, влажность воздуха, освещенность, влажность почвы; $l = 1, 2, 3, 4$ – номер интегрального показателя: суммарная эффективная температура, суммарная эффективная освещенность, световой период, теплопериод; $m = 1, 2, 3, 4$ – номер агротехнического показателя растения: число настоящих листьев, число завязей, число зеленцов, число спелых плодов; $p = 1, 2, 3$ – номер технологического процесса: вентиляция, освещение, полив.

2. ЗАДАЧА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ МОДЕЛИ «РАСТЕНИЕ–СРЕДА–СИТУАЦИЯ–УПРАВЛЕНИЕ»

В распоряжении эксперта, с участием которого формируется технологическое управление, имеется база данных (БД), в которой на всем интервале вегетации зафиксированы в динамике состояния растений $Z(t)$, климатические факторы $F(t)$, режимные параметры технологических операции $u_r(t)$, $r = 0, 1, 2, 3$ (норма / режим вентиляции / режим освещения / режим полива). Эксперт по состоянию растений и климатическим факторам $F(t)$ в БД оценивает ситуацию $O(t)$.

В зависимости от ситуации $O(t)$ выбираются соответствующие режимы управления $U(t(D, J))$ по климату $D = \{1; 0\}$ (день/ночь) и по фазе $J = \{0; 1; 2; 3\}$ (фаза 0, фаза 1, фаза 2, фаза 3). Цель экспертной системы – дать оценку близости ситуации оптимуму $OPT(t)$, который включает нормы среды и необходимые условия роста растения. Таким образом, если исходную информацию в БД, в которой зафиксирована эволюция состояния среды и растения под воздействием климатических факторов и вариантного технологического управления, дополнить оценками эксперта по исходной ситуации, то она уже становится базой знаний (БЗ).

В таком случае задачей обработки полученной БЗ будет получение правила выбора вариантов технологического управления в зависимости от ситуации. Это решающее правило (РП) должно удовлетворять требованиям максимума результативности управления по заданной экспертом шкале:

$$U^*(t) = \arg \max \{OPT(t) | O(t, X, F, U)\}. \quad (2)$$

Заметим, что полученное решение РП используется одинаково как на стадии планирования, так и при реализации технологических управлений в реальном времени.

При реализации алгоритмов обработки БЗ в работе применяется нейросетевой подход. Во входном слое нейронной сети по вектору состояния растений $X(t)$ и климатическим факторам $F(t)$ формируются оценки технологической ситуации:

$$\hat{O}(t) = K_1^T X(t) + K_2^T F(t), \quad (3)$$

$$K_1^T, K_2^T = \arg \min [O(t) - K_1^T X(t) + K_2^T F(t)], \quad (4)$$

где K_1^T, K_2^T – матрицы параметров первого слоя нейронной сети; $\hat{O}(t)$ – оценки ситуации, задаваемые экспертом. Схема формирования технологического управления с участием экспертной системы и нейронной сети приведена на рис. 1.

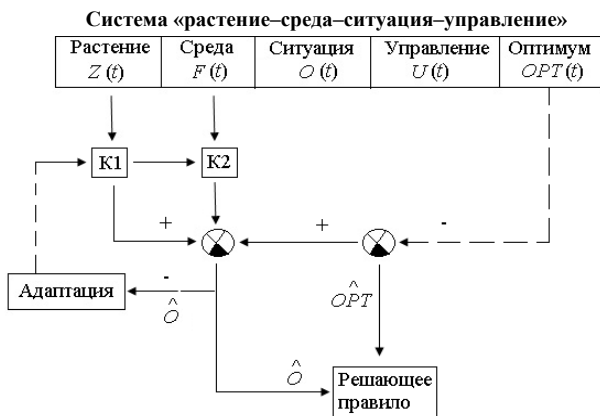


Рис. 1. Схема управления системой с участием экспертной системы

Поставленная задача (2)–(4) является задачей идентификации блока «ситуация – управление». Таким образом, на основе информации о состоянии среды $F(t)$ и растения $Z(t)$, и требований условий оптимума $OPT(t)$ формируются оценки ситуации $\hat{O}(t)$. В зависимости от этой ситуации система формирует РП $U^*(t)$, обеспечивающее выполнение условия (2).

3. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МОДЕЛИ В ВИДЕ СИСТЕМЫ «АҚЫЛДЫ ЖЫЛЫЖАЙ» И ВНЕДРЕНИЕ В ТЕПЛИЦУ УНИВЕРСИТЕТА

Модель (1) реализована в виде программно-технической системы «Ақылды жылыжай» и внедрена в теплице КазНУ им. Аль-Фараби [1, 7]. Ее функциональная схема приведена на рис. 2. Она состоит из основных блоков: а) объекта управления, в центре которого расположено растение; б) информационно-измерительной системы; в) исполнительных механизмов; г) устройства управления (УУ). Системой управляет УУ, построенное на базе модели (2)–(4), которое вырабатывает управляющее воздействие на основе правил эксперта, текущей входной информации, полученной с датчиков среды, и отправляет соответствующему исполнительному механизму. Обмен данными также происходит через УУ, которое посылает данные на облачное хранилище данных Blynk. Данные из облачного хранилища для машинной обработки поступают на скрипт Matlab, после обработки обратно поступают к УУ через облачное хранилище. Данные мониторинга сохраняются в хранилище в течение всего вегетационного периода.

Практическая реализация системы «Умная теплица» (рис. 2), обладающей требуемыми функциональными возможностями [1, 7], возможна только при использовании современных беспроводных, IoT и интеллектуальных технологий. В качестве беспроводных и IoT-устройств были использованы недорогие микроконтроллеры серии ESP32 с низким энергопотреблением. Главное их достоинство: передатчик ESP32 WiFi&Bluetooth CP2104 DHT11 Soil battery, имеющий встроенные датчики воздуха, освещения и почвы, и приемник ESP 32 WiFi&Bluetooth battery могут осуществлять бесперебойную передачу данных и через WiFi, и через Bluetooth после отключения сети через встроенную батарею.

На рис. 3 и 4 показаны экспериментальные данные о среде и растении за 75 дней. Это среднесуточные данные среды и средний показатель урожайности каждого растения. Средний урожай составил 3-4 кг с одного растения. Поддерживая оптимальные условия в теплице, можно получить несколько урожаев в течение двух-трех месяцев.

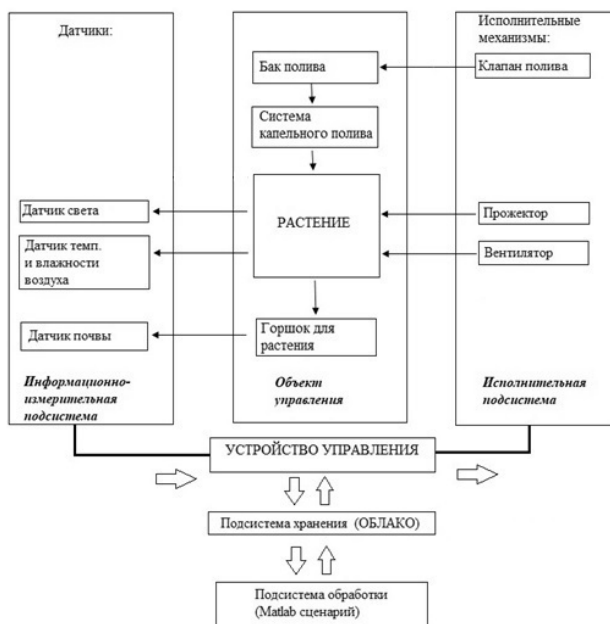


Рис. 2. Функциональная схема автоматизации теплицы

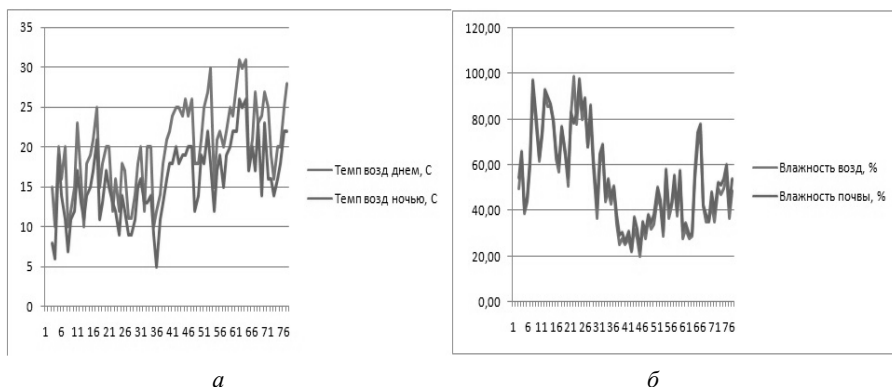


Рис. 3. Данные мониторинга:

а – температуры воздуха; б – влажности воздуха

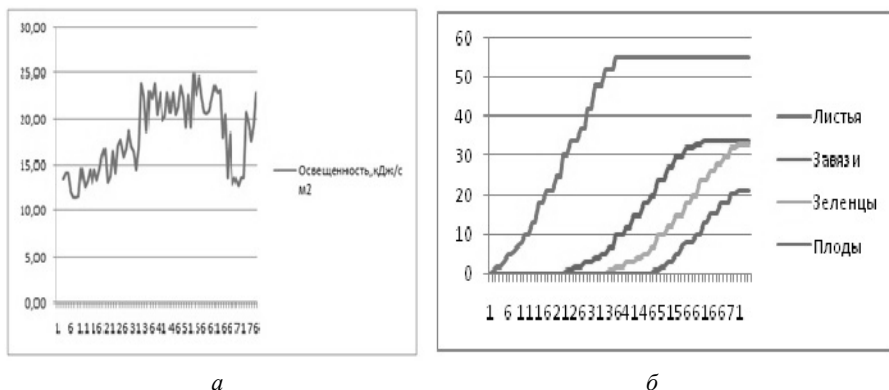


Рис. 4. Данные мониторинга:

а – освещенности; б – динамики роста

С помощью проведенного биологического эксперимента были получены оценки состояния воздушной и почвенной среды, освещенности и общая интегральная оценка среды и растения. Рассчитанные условия наступления фаз: $t^* = 9$, $t^{**} = 31$, $t^{***} = 57$, реальные моменты фаз растения соответственно равны: $t^* = 11$, $t^{**} = 38$, $t^{***} = 65$.

На рис. 5 и 6 изображены гистограммы, показывающие значения средне-квадратических отклонений от оптимумов для воздушной среды, освещенности, почвы и растения. Значения оценок соответственно равны: $O1 = 0.4008$, $O2 = 0.1797$, $O3 = 1.5159$ (рис. 5, рис. 6, а). Общая интегральная оценка составляет $O = 2.1105$ (рис. 8, а). Графики нечеткого логического вывода базы знаний Aqildi_Plant_Optimum на рис. 7 и 8 показывают, что интегральное состояние среды и растения находится вблизи зоны оптимума, обеспечивая тем самым благоприятные условия для растений. Результаты подтверждают, что наблюдаемые состояния подчиняются закону оптимума в течение всего периода роста растения.

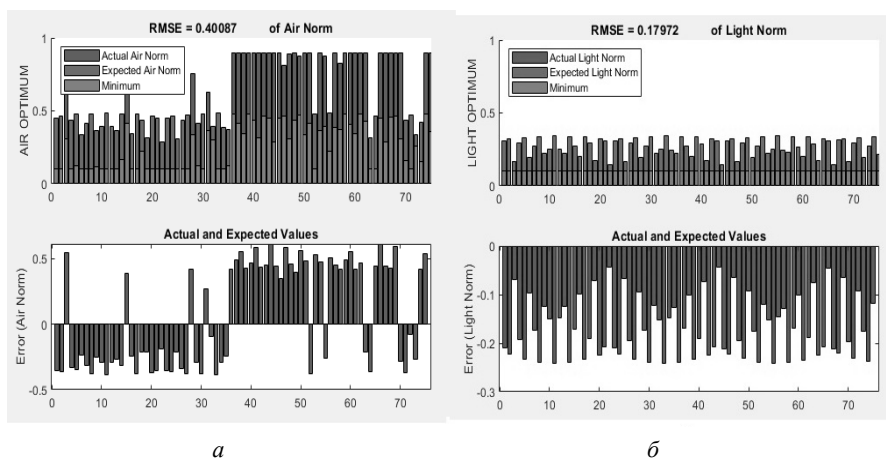


Рис. 5. Оценка оптимума:

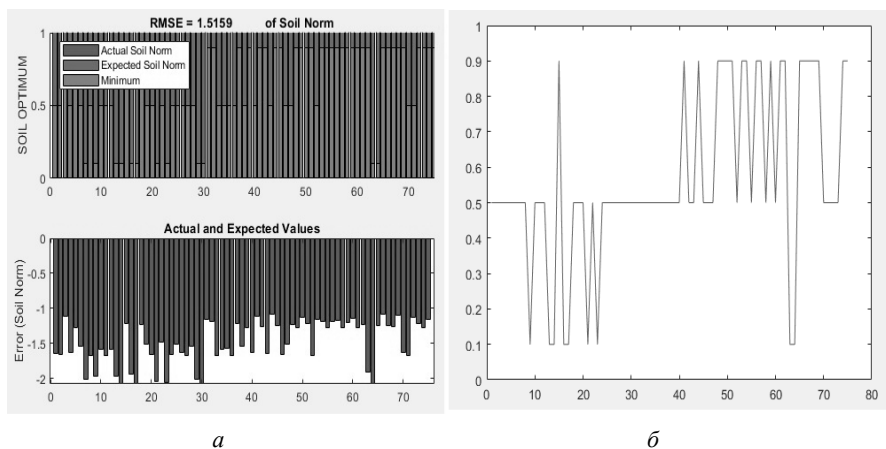
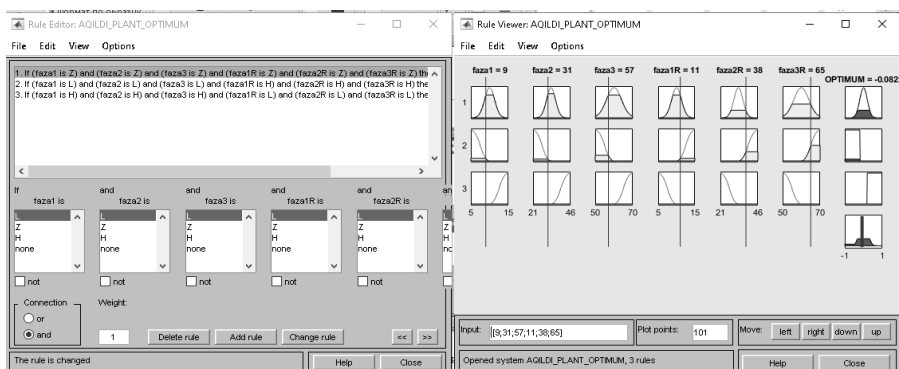
 a – воздушной среды; b – освещенности

Рис. 6. Оценка оптимума:

 a – почвенной среды; b – нечеткого вывода почвенной среды FIS_OPT3

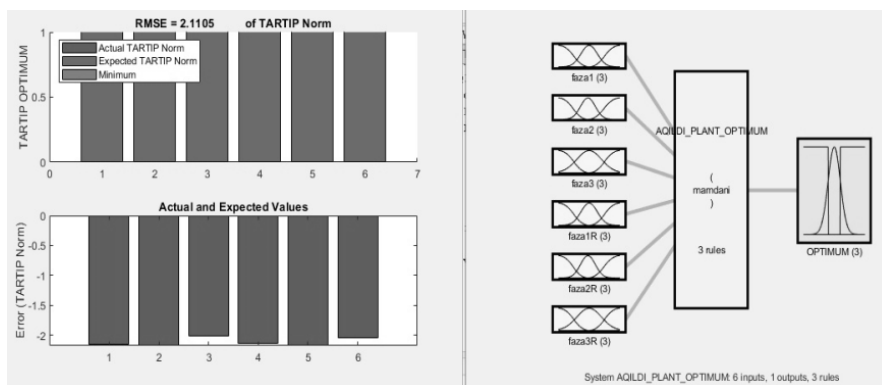


а

б

Рис. 7. База знаний Aqildi_Plant_Optimum:

а – правила; б – вывод правил



а

б

Рис. 8. База знаний Aqildi_Plant_Optimum:

а – расчет оценки; б – структура системы

На рис. 9 представлена теплица КазНУ им. Аль-Фараби в вегетационный период выращивания культуры огурцов и схема третьего блока, где был проведен эксперимент.

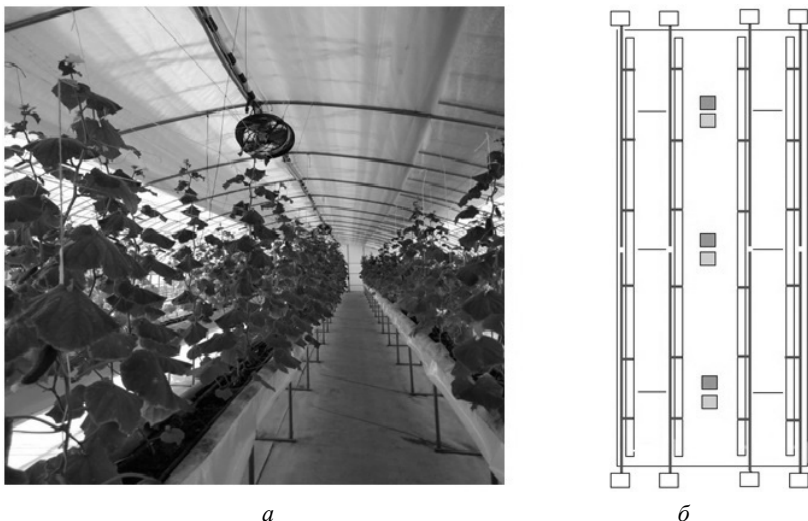


Рис. 9. Теплица КазНУ им. Аль-Фараби:

а – выращивание культуры огурцов; *б* – схема третьего блока

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе рассматривается модель системы «растение–среда–ситуация–управление», предлагаемая авторами как альтернативный вариант системы «почва–растение–атмосфера». В отличие от системы «почва–растение–атмосфера», являющейся моделью типа белого ящика, предлагаемая модель является моделью типа черного ящика и позволяет описывать процессы на основе экспериментальных данных.

На базе построенной модели системы «растение–среда–ситуация–управление» была практически реализована программно-техническая система «Акылды жылыжай» и внедрена в теплице КазНУ им. Аль-Фараби.

В результате исследования были сделаны следующие выводы:

а) при оптимальных условиях среды наблюдается процесс нормального, сбалансированного роста растения;

б) при неоптимальных условиях, т. е. при недостатке определенных факторов (тепло, воздух, свет, вода), наблюдается замедленный процесс роста растения.

Для оценки состояния планируется в будущем применить технологию компьютерного зрения в двух вариантах: 1) сегментация отдельных растений

и оценка (распознавание), 2) без сегментации для группы растений. Этот способ поможет полностью автоматизировать процесс оценки состояния растений и тем самым повысить точность оценки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бельгибаев Б.А., Умаров А.А.* Домашняя смарт-теплица: патент на полезную модель. – № 2019/1162.2. – 30.12.2019.
2. *Гриф М.Г.* Гибридная экспертная система проектирования человеко-машинных систем и принятия решений ИНТЕЛЛЕКТ-3: учебное пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007. – 160 с.
3. *Михалейко И.М.* Управление системами точного земледелия. – СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2005. – 234 с.
4. *Михайленко И.М.* Математическое моделирование роста растений на основе экспериментальных данных // Сельскохозяйственная биология. – 2007. – № 1. – С. 103–111.
5. Модели продукционного процесса сельскохозяйственных культур / Р.А. Полуэктов, Э.И. Смоляр, В.В. Терлеев, А.Г. Топаж. – СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2006. – 396 с.
6. *Савосин С.И.* Интеллектуальная система контроля влажности и температуры воздуха в теплице: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 2009. – 25 с.
7. Умная теплица: свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 7578 / Умаров А.А., Бельгибаев Б.А., Мансурова М.Е., Арипхан Ж.Н. – Запат. 17.01.2020.
8. *Klapwijk D.* Kasklimaat: plantengroei en groeibeheersing onder glas. – Amsterdam: Agon Elsevier, 1971. – 126 p.
9. *Akkac M.A., Sokullu R.* An IoT-based greenhouse monitoring system with Micaz motes // Procedia Computer Science. – 2017. – Vol. 113. – P. 603–608.
10. *Syam R., Piarah W.H., Jaelani B.* Controlling smart green house using fuzzy logic method // International Journal on Smart Material and Mechatronics. – 2015. – Vol. 2, N 2. – P. 116–120.
11. *Revathi S., Sivakumaran N.* Fuzzy based temperature control of greenhouse // IFAC-PapersOnLine. – 2016. – Vol. 49 (1). – P. 549–554.
12. *Thornley J.H.M.* Mathematical models in plant physiology. – London; New York: Academic press, 1976. – 318 p.
13. *Ahmad U., Subrata D.M., Arif Ch.* Speaking plant approach for automatic fertigation system in greenhouse // International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition. – 2011. – Vol. 4, N 3.

Гриф Михаил Геннадьевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры автоматизированных систем управления Новосибирского государственного технического университета. E-mail: grifmg@mail.ru

Бельгибаев Бауржан Абдрахимович, доктор технических наук, доцент кафедры искусственный интеллект и Big Data Казахского национального университета им. Аль-Фараби. E-mail: bbelgibaev@list.ru

Умаров Амантур Амангельдыевич, докторант PhD кафедры «Искусственный интеллект и Big Data» Казахского национального университета им. Аль-Фараби. E-mail: uaa_77@mail.ru

DOI: 10.17212/2307-6879-2020-3-49-64

Development of a “smart greenhouse” based on the model “plant–environment–situation–control”*

M.G. Grif¹, B.A. Belgibaev², A.A. Umarov³

¹ *Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Avenue, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Automated Control Systems. E-mail: grifmg@mail.ru*

² *Kazakh National University them. Al-Farabi, 71 Al-Farabi Avenue, Almaty, 050400, Kazakhstan, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Artificial Intelligence and Big Data. E-mail: bbelgibaev@list.ru*

³ *Kazakh National University them. Al-Farabi, 71 Al-Farabi Avenue, Almaty, 050400, Kazakhstan, PhD student, Department of Artificial Intelligence and Big Data. E-mail: uaa_77@mail.ru*

The greenhouse is a closed-type agroecological system in which energy processes are strictly determined by the technological process of growing plants, taking into account the influence of the environment. As you know, greenhouse models are divided into two types: white box models and black box models. The well-known model of the “Soil-Plant-Atmosphere” system belongs to the first type, built on the physical principles of thermo-, hydro- and gas dynamics. They consist of several complex differential equations that use numerous coefficients and parameters that are known in advance. Such models are cumbersome and require large computational resources and time-consuming. The proposed model of the system “Plant-Environment-Situation-Management” is a practical analogue of the well-known model “Soil-Plant-Atmosphere”. The main difference of this model is that it refers to a black box model, which is an approximation of the observed processes and allows you to describe processes based on experimental data. On the basis of the “Plant-Environment-Situation-Management” model, the software and hardware system “Smart Greenhouse” was developed, which is a human-machine system with a rational separation of the functions of preparation (computer) and decision-making (Man). It allows you to control and control the growth and development of the

* Received 10 September 2020.

plant during the growing season, taking into account the influence of environmental conditions. The system is implemented and used in the greenhouse of the Kazakh National University. Al-Farabi.

Keywords: smart greenhouse, expert system, optimum law, human-machine system, “Soil–Plant–Atmosphere” system, IoT devices, cloud technologies

REFERENCES

1. Belgibaev B.A., Umarov A.A. *Domashnyaya smart-teplitsa teplica* [Home smart greenhouse]. Patent RF, no. 2019/1162.2, 2019.
2. Grif M.G. *Gibridnaya ekspertnaya sistema proektirovaniya cheloveko-mashinnykh sistem i prinyatiya reshenii INTELLEKT-3* [INTELLECT-3 hybrid expert system for designing human-machine systems and decision making]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2007. 160 p.
3. Mikhaleinko I.M. *Upravlenie sistemami tochnogo zemledeliya* [Managing precision farming systems]. St. Petersburg, St. Petersburg University Publ., 2005. 234 p.
4. Mikhailenko I.M. Matematicheskoe modelirovanie rosta rastenii na osnove eksperimental'nykh dannykh [Mathematical modelling of plant growth on the basis of experimental data]. *Sel'skokhozyaistvennaya biologiya = Agricultural Biology*, 2007, no. 1, pp. 103–111.
5. Poluektov R.A., Smolyar E.I., Terleev V.V., Topazh A.G. *Modeli produktsionnogo protsessa sel'skokhozyaistvennykh kul'tur* [Models of the production process of agricultural crops]. St. Petersburg, St. Petersburg University Publ., 2006. 396 p.
6. Savosin S.I. *Intellektual'naya sistema kontrolya vlazhnosti i temperatury vozdukha v teplitse*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Intelligent greenhouse air humidity and temperature control system. Author's abstract of PhD eng. sci. diss.]. Moscow, 2009. 25 p.
7. Umarov A.A., Belgibaev B.A., Mansurova M.E., Aripkhan Zh.N. *Umnaya teplitsa* [Smart greenhouse]. The Certificate on official registration of the computer program. No. 7578, 2020.
8. Klapwijk D. *Kasklimaat: plantengroei en groeibeheersing onder glas*. Amsterdam, Agon Elsevier, 1971. 126 p.
9. Akkac M.A., Sokullu R. An IoT-based greenhouse monitoring system with Micaz motes. *Procedia Computer Science*, 2017, vol. 113, pp. 603–608.
10. Syam R., Piarah W.H., Jaelani B. Controlling smart green house using fuzzy logic method. *International Journal on Smart Material and Mechatronics*, 2015, vol. 2, no. 2, pp. 116–120.

11. Revathi S., Sivakumaran N. Fuzzy based temperature control of greenhouse. *IFAC-PapersOnLine*, 2016, vol. 49 (1), pp. 549–554.
12. Thornley J.H.M. *Mathematical models in plant physiology*. London, New York, Academic press, 1976. 318 p.
13. Ahmad U., Subrata D.M., Arif Ch. Speaking plant approach for automatic fertigation system in greenhouse. *International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition*, 2011, vol. 4, no. 3.

Для цитирования:

Гриф М.Г., Бельгибаев Б.А., Умаров А.А. Разработка «Умной теплицы» на основе модели «растение–среда–ситуация–управление» // Сборник научных трудов НГТУ. – 2020. – № 3 (98). – С. 49–64. – DOI: 10.17212/2307-6879-2020-3-49-64.

For citation:

Grif M.G., Belgibaev B.A., Umarov A.A. Razrabotka “Umoi teplitsy” na osnove modeli “rastenie–sreda–situatsiya–upravlenie” [Development of a “smart greenhouse” based on the model “plant–environment–situation–control”]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = *Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2020, no. 3 (98), pp. 49–64. DOI: 10.17212/2307-6879-2020-3-49-64.